ИНЖЕНЕРНО-АГРОПРОМЫШЛЕННЫЕ СПЕЦИАЛЬНОСТИ

УДК 631.362.001.573

Ю.И. ЕРМОЛЬЕВ, М.Ю. КОЧКИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА

Приведен общий подход построения математической модели процесса функционирования зерноочистительного агрегата с различными структурными схемами, синтезированы их рациональные параметры и функциональные показатели.
Ключевые слова: *структурная схема, математическая модель, частные операции, система, показатели функционирования.*

Введение. Традиционная технология очистки продовольственного зерна в сельском хозяйстве предусматривает последовательный пропуск всего обрабатываемого зернового материала через комплекс зерноочистительных машин в агрегате. При наличии в обрабатываемом зерновом материале примесей, которые выделяются только на триерном блоке, возникают трудности (невысокая производительность триерного блока – 5-10т/ч), что создает диспропорцию между возможностями технологического оборудования в поточной линии. Производительность воздушно-решетных зерноочистительных машин (ВРМ) в среднем в два раза выше производительности последовательно работающих триерных блоков. Параллельное же объединение нескольких триерных блоков вызывает значительное увеличение габаритных размеров, стоимость агрегата, усложняет его конструкцию, энергоемкость, ремонт и, что особенно важно, может привести к росту приведенных затрат на очистку зернового материала. Изменение структуры агрегата, технологических свойств и подачи обрабатываемого материала в агрегат оказывает влияние на качество очищенного зерна.

Постановка задачи: моделирование процесса сепарации зерна в зерноочистительном агрегате (ЗОА), выявление закономерностей изменения технологических показателей первичной очистки зерна пшеницы в агрегате с различной структурой от изменений технологических свойств и подачи исходного зернового материала в агрегат.

Методы исследования: моделирование на ЭВМ процессов функционирования зерноочистительного агрегата с различной структурой, многомерный анализ и параметрический синтез системы элементов в агрегате.

Обоснование математической модели зерноочистительного агрегата. Математическую модель процесса функционирования зерноочистительного агрегата как замкнутой квазистатичной системы с заданной $\kappa_{\delta M}$ -й функциональной схемой в общем виде можно записать:

$$\mathrm{E}_{\phi\delta O} = \{F, A, G_\delta [k_{\delta M}(x), T_{\delta M}(x)]\} \to \max ;$$

$$A_i \subset A_i, \quad F \subset F, \quad x \in G_i(x,u);$$

$$в_j \le [в_j], \qquad \delta_з \le [\delta_з].$$

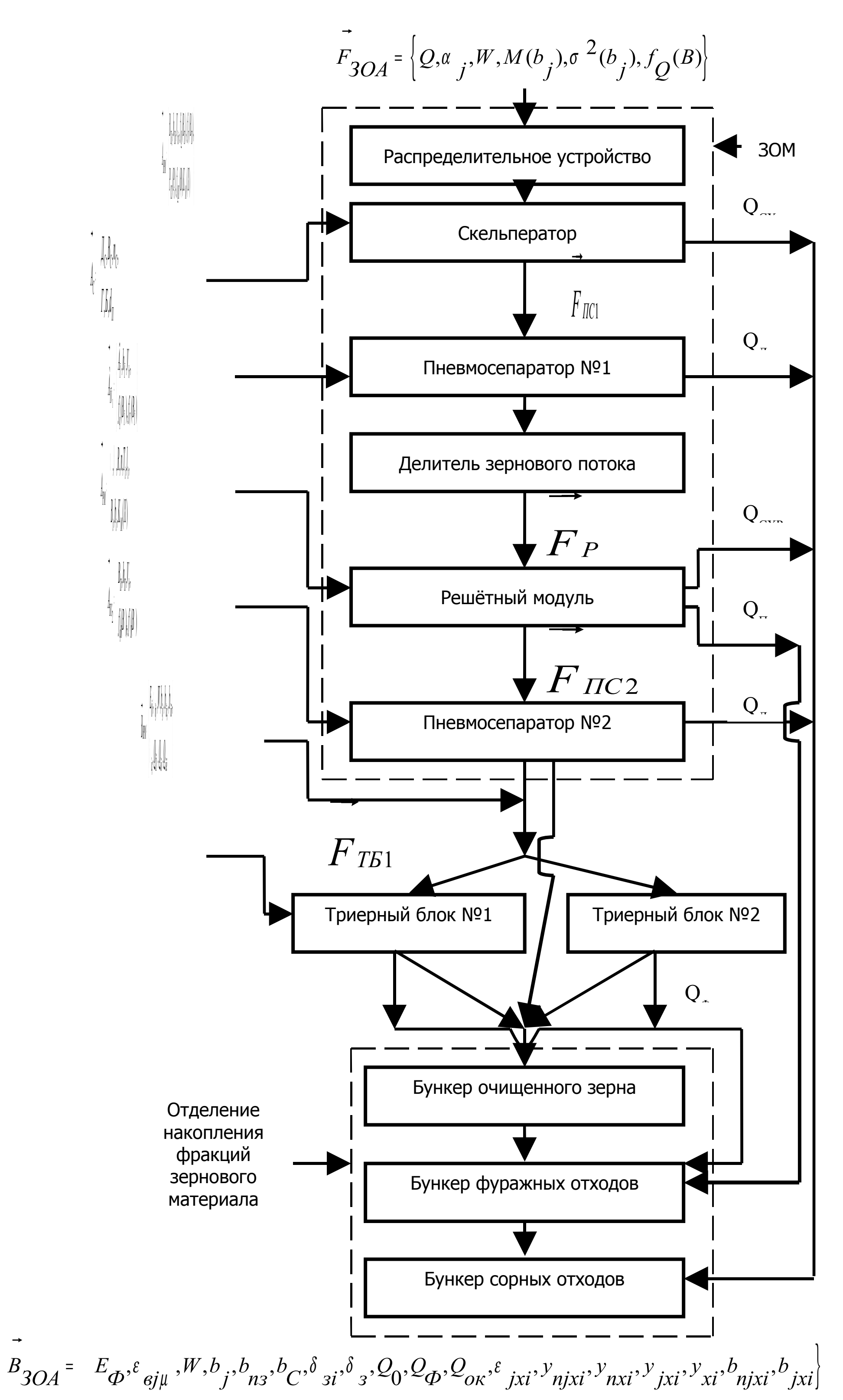


Рис.1. Структурная схема зерноочистительного агрегата

Здесь $F = F_{ÇÎÂ}$ - вектор входных воздействий на принятую в ЗОА систему операций, показанную на рис.1, где Q - подача зернового материала в ЗОА; a_j, W - содержание в исходном материале j-х компонентов, их влажность; $M\left(b_j\right), \sigma^2\left(b_j\right)$ математические ожидания и дисперсии размеров признаков разделения j-х компонентов; $f_Q(B)$ - плотность вероятности распределения подачи Q зернового материала по ширине В рабочих органов зерноочистительных машин в ЗОА;

A_i - векторы управляющих факторов элементов системы, обеспечивающих ее функционирование ($A_{ВРМ}$ - воздушно-решетной машины, A_C -скельпературы, $A_{ПС}$ - пневмосепаратора, $A_{РМ}$ - решетного модуля, $A_{ТБ}$ - триерного блока), где $B_{пi}, h_{пi}$ - ширина и глубина пневмосепараторов ВРМ; $V_{вi}$ - рабочая скорость воздушного потока; плотность вероятностей распределения подачи $f_q(B_п)$ зернового материала и воздушного потока $f_v(B_п)$ по ширине $B_п$ пневмосепаратора; $P_{сх}\left(P_i\right)$ - функциональные схемы решетных модулей; плотности вероятности распределения зернового материала по решетным ярусам $f_{Qx}(H)$ и по ширине решет $f_{Qx}(B)$ в решетных модулях зерноочистительной машины ОЗС-50/25/10; $K_{\delta M}\left(x\right)$ - функциональная схема и параметры ВРМ;

$Д_с$, $В_с$, $n_с$- диаметр, ширина и частота вращения скельператора; Г, Б, $d_п$ – ширина, длина отверстий и диаметр проволоки скельператора;

α, β, R, n- угол наклона, направленность, амплитуда и частота колебаний решет; T_i, l_i, B_i, b_i- тип решета, его длина, ширина, размеры отверстий; $K_M(X)$- функциональная схема решетного модуля;

Д, L,$n_{ТЦ}$ – соответственно диаметр, длина и частота вращения триерных цилиндров, α – угол наклона приемного лотка, $K_{\delta Т}(x)$ – функциональная схема триерных блоков;

X - набор технологических операций из $G_i\left(x, u\right)$ множества, реализуемых в $K_{\delta м}$ функциональной схеме ЗОА; $G_{\delta}K_{\delta M}x(T), {}_{\delta M}x(\ )$ - математическая модель, определяющая показатели технологического процесса в ЗОА для принятой $K_{\delta_м}(X)$-й его схемы.

Выходные показатели функционирования воздушно-решетной машины (входные для триерных блоков) определяются вектором $B_{ВРМ}$ и всего агрегата $B_{ЗОА}$, независимые аргументы которого случайные в вероятностно-статистическом смысле величины (см. рис.1), где $E_ф$ - критерий эффективности реализации технологического процесса в воздушно-решетной машине или зерноочистительном агрегате [1]; $\varepsilon_{bj\mu}$ - полнота выделения из зернового материала отделяемых j-х компонентов, $\delta_{зi}, \delta_з$ - потери

зерна на xi операции и общие; $Q_{оф} Q_{дк} Q$ - масса выхода очищенного зерна, фуражных отходов и отходов разных категорий соответственно; масса y_{njxi}, y_{nxi}, j-х и всех компонентов, содержащихся в зерновом материале после реализации xi -й операции; масса y_{jxi}, y_{xi} j-х и всех компонентов, выделенных из зернового материала после реализации xi -й операции; содержание j-го компонента в массе b_{njxi} очищаемого материала и в выделяемых фракциях b_{jxi}; полнота прохода ε_{jxi} j-го компонента в очищаемый зерновой материал после выполнения xi -й операции.

Обоснуем математическую модель $G_{\delta} \quad K_{\delta\, MM}(X), T_{\delta} \quad (X)$ ЗОА. В соответствии с принципиальной схемой рассматриваемого варианта (см. рис.1), ЗОА содержит зерноочистительную машину ОЗС-50/25/10 и один или два триерных блока (ТБ) типа ЗАВ-10.90000А с известными функциональными связями между частными технологическими операциями.

Для этих условий полнота выхода ε_{bj} j-го компонента исходного зернового материала в очищенную в агрегате фракцию зерна

$$\varepsilon_{bj} = \prod_{Ì=1}^{Ê} \varepsilon_{bjM} ,$$

где ε_{bjM} - полнота выхода j-го компонента, поступившего в соответствующую зерноочистительную машину (К=1(только ВРМ)), К=2(ВРМ+ТБ), К=3(ВРМ+ два ТБ)), - в зерно, очищенное рассматриваемой машиной.

Полнота выхода ε в отходы j-го компонента в ЗОА

$$\varepsilon_{bOTj} = \sum_{M=1}^{Ê} Q_{bOTjM} \cdot b_{bOTjM} / Q \cdot a_j ,$$

где Q_{bOTjM} - количество j-го компонента зернового материала выделенного М-й машиной в отходы; b_{bOTjM} - содержание j-го компонента в отходах М-й машины.

В машине ОЗС-50/25/10 последовательно реализуются четыре частные операции (см. рис.1). Для этих условий функционирования полнота выхода j-го компонента в очищенную машиной фракцию зерна

$$\varepsilon_{bj1} = \prod_{ОП=1}^{4} \varepsilon_{bjОП} .$$

Полнота выхода j-го компонента исходного зернового материала в сорные отходы (сход $Q_{СХС}$ со скельператора, выход из отстойных камер двух пневмосепараторов $Q_{Л1}$ и $Q_{Л2}$ аспирационной системы ОЗС-50/25/10, сход $Q_{СХР}$ с решет решетного модуля)

$$\varepsilon_{OTj1} = \left(Q_{СХС} \ b_{jС} + Q_{Л1} \ b_{j1} + Q_{Л2} \ b_{j2} + Q_{СХР} \ b_{jр} \right) / Q \quad a_j ,$$

где b_{jc}; b_{j1}; b_{j2}; $b_{jр}$ - соответственно содержание j-го компонента в сходовой фракции со скельператора, во фракциях, выделенных в легкие

отходы пневмосепараторами №1 и №2, в сходовой фракции с решет решетного модуля. Полнота выхода j-го компонента исходного зернового материалы в фуражные отходы (прохода вторых подсевных решет в решётном модуле $Q_{П2j}$)

$$\varepsilon_{вфj1} = Q_{П2j} \; b_{П2j} / Q \; a_j ,$$

где $b_{П2j}$ - содержание j-го элемента в фуражных отходах.

Полнота выхода j-го компонента зернового материала в фуражные отходы после триерного блока (блоков)

$$\varepsilon_{вфjT} = Q_{ФT} \; b_{фTj} / Q_{MO} \; b_{MJ} ,$$

где $Q_{ФT}, b_{ФTj}$ - количество и содержание j – го компонента во фракциях, выделенных ТБ в фуражные отходы.

Для операции (распределение зернового материала по ширине скельператора) очевидно, что $\varepsilon_{bjPУ} = 1$. Воздействие этой операции на последующую определится плотностью вероятности $f_Q(B)$ распределения подачи Q зернового материала по ширине B скельператора. Рассмотрим процесс пневмосепарации гетерогенной сыпучей среды в пневмоканале шириной B и глубиной S (рис. 2) с подачей Q в него гетерогенной сыпучей среды с известной или задаваемой плотностью вероятностей $f_Q(B)$ распределения этой подачи по ширине бокового ввода в пневмоканале и плотностью вероятности $f_V(B)$ распределения средних по сечению пневмоканала скоростей воздушного потока.

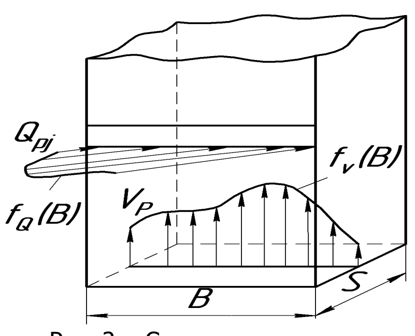


Рис. 2. Схема пневмоканала сепаратора

Для этих условий полнота прохода j-го компонента (j=1,2,…b) зернового материала в очищенную на этой частной операции фракцию [2]

$$\varepsilon_{bjП} = \frac{\sum_{p=1}^{e} Q_P \varepsilon_{Pj}(Q_{Pj} V_P)}{B \; Q K} m_{jB} \; m_{jw} ,$$

где $K = B / e$ - количество зернового материала Q_P, попадающего на каждый р-ый участок (р=1,2,…,е) к-й ширины рабочего органа:

$$Q_p = \frac{B\ Q_0}{k}\frac{\int_{p-1}^{p} f_q(B)\,dB}{\sum_{p=1}^{e}\int f_q(B)\,dB},$$

а средняя скорость воздушного потока ρ-м участке

$$V_p = \frac{B\ V}{k}\frac{\int_{p-1}^{p} f_v(B)\,dB}{\sum_{p=1}^{e}\int f_v(B)\,dB},$$

где $\varepsilon_{Pj}(Q_P V_p)$ - полнота выхода в очищенное зерно j-го компонента зернового материала с р-го участка ширины пневмоканала (р = 1,2, …, e) определится из известных выражений [1,3] при Q= Q_P и $V = V_P$.

Содержание сорных (j = 1,2,…,c) примесей b_C в очищенном зерне

$$b_C = \sum_{j=C} a_j \varepsilon_{bjП} / \sum_{j=1}^{b} a_j \varepsilon_{bjП},$$

полнота выделения пневмосепаратора в отходы сорных (j = 1,2,…,c) примесей

$$\varepsilon_{bc} = \sum_{J=C} a_j (1-\varepsilon_{bjП}) / \sum_{j=1}^{b} a_j,$$

содержание j– х компонентов в очищенном зерне

$$b_j = a_j \varepsilon_{bjП} / \sum_{j=1}^{b} a_j \varepsilon_{bjП},$$

полнота выделения j–го компонента из зернового материала в пневмосепараторе

$$\varepsilon_{bj} = (1-\varepsilon_{bjП}),$$

содержание b_{j1} j–го компонента зернового материала в легких отходах

$$b_{j1} = a_j (1-\varepsilon_{bjП}) / (\sum_{j=1}^{b} a_j (1-\varepsilon_{bjП}));$$

масса выделенных отходов

$$Q_Л = \sum_{j=1}^{b} Q a_j (1-\varepsilon_{bjП});$$

масса очищенного в пневмосепараторе зерна

$$Q_{КЛ} = Q - Q \quad . \qquad (1)$$

Входное воздействие на рассматриваемый решетный модуль (см. рис.1, частные операции) выражается вектором F_p, независимые аргументы которого случайные в вероятностно-статистическом смысле величины

$$F_p = \left[Q_{рм}, a_{pj}, W, M\left(b_j\right), \sigma^2\left(b_j\right), f_Q\left(B_i\right), f_Q\left(H\right), f\left(l_i\right)\right].$$

Активные средства, определяющие эффективность функционирования решетного модуля, определялись вектором $A_{рм}$ (см.рис.1), где Q_{pi}, a_{pj} - подача зернового материала $Q_{РМ}=Q_К$ из (1), содержание в нем j-х компонентов; $f_Q\left(B_i\right), f_Q\left(H\right)$ - плотность вероятности распределения j-го компонента по ширине B_i i-го решета в ярусе и по высоте ярусов в решетном модуле; $f\left(l_i\right)$ - закономерность поступления зернового материала на решета.

Приняв известную гипотезу об аддитивности процесса сепарации сыпучего материала на P -х участках решетных ярусов, полнота просеивания j -го компонента на δ -м решетном ярусе (δ=1,2,…,4) для воздушно-решетной машины ОЗС-50/25/10) при известных $f_Q\left(H\right)$ и $f_q\left(B\right)$ определится выражением [3]

$$\varepsilon_{\delta j} = \frac{\sum\limits_{p=1}^{e} Q \dfrac{\int_{r-1}^{r} f_Q(H)dH}{\int_{c} f_Q(H)dH \; \sum\limits_{r=1}} \dfrac{\int_{p-1}^{p} f_{\delta q}(B)dB}{\int_{l} f_{\delta q}(B)dB \; \sum\limits_{p=1}} a_{j\delta}\, \varepsilon_{\delta jp}(q_{\delta p})}{\sum\limits_{j} q_{\delta}\, a_j},$$

где $\varepsilon_{\delta jp} = \varepsilon_{\delta 1j} + (1 - \varepsilon_{\delta 1j})\varepsilon_{\delta 2j}$.

При этом подача сыпучего материала на δ -й решетный ярус

$$q_\delta = Q \; P_{fQ} \quad .$$

Полнота просеивания j -го компонента на P -м участке δ -го решетного яруса при подаче $q_{\delta p}$ сыпучего материала на этот участок определится из различных выражений [1] в зависимости от многих факторов:

$$\varepsilon_{\delta j}\left(q_{\delta p}\right) = f\left(Q, a_j, W, \gamma, f_j, L_{\delta m}, d_m, \alpha_m, \beta_m, R_m, N_m, n\right),$$

где f_j, γ - вид сыпучего материала (зерно, семена трав и др.) и его плотность; $L_{\delta m}$ - длина m -го решета δ -го решетного яруса; $d_{\delta m}$ - рабочий размер отверстий m -го решета δ -го яруса; $\alpha_{\delta m}, \beta_{\delta m}, R_{\delta m}, N_{\delta m}$ - угол наклона к горизонту, направленность, амплитуда и частота колебаний m -го решета в δ -м ярусе; n - ко-

личество решет в ярусе.

При известной полноте просеивания $\varepsilon_{\delta j}$ j-го компонента на отдельном ярусе решет ($\delta = 1,2,\ldots,k$) полнота просеивания j-го компонента на четырех ярусах решетного модуля определится из выражения [3]

$$\varepsilon_j = \frac{\sum_{\delta=1}^{4} q_\delta \cdot a_{\delta j} \cdot \varepsilon_{\delta j}}{Q \cdot a_j \cdot k},$$

где $a_{\delta j}$ - содержание j-го компонента в сыпучем материале, поступающем на δ-й решетный ярус.

Полнота схода j-го компонента с δm-го решета [3]

$$\varepsilon_{CX\delta mj} = \frac{\sum_{p=1}^{l} q_{\delta mp} a_j \varepsilon_{CX\delta mj}\left(q_{\delta mp}\right)}{q_{\delta m} a_j l},$$

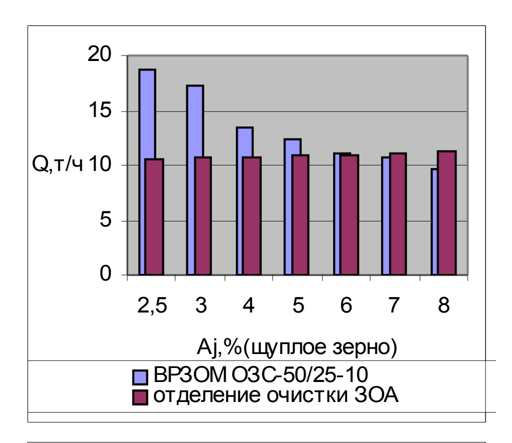
а со всех m-х решет k-ярусного решетного модуля

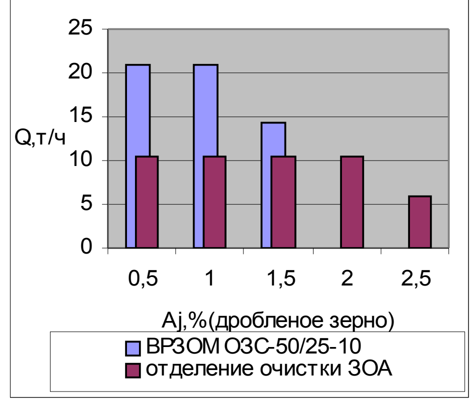
$$\varepsilon_{CXmj} = \sum_{\delta=1}^{k} P_{\Gamma Q} \varepsilon_{CX\delta mj}.$$

Программа реализации и оценки функциональных показателей зерноочистительного агрегата. Полученные математические модели частных технологических операций и всей системы операций с учетом их адекватности известной модели [1] процесса сепарации зернового материала в ТБ позволили разработать программу, использующую метод нелинейного программирования для параметрического синтеза систем рассматриваемых частных операций, технических средств для их реализации и оценки рациональных функциональных показателей различных структур зерноочистительного агрегата.

Для реализации поставленных задач исследований с использованием методов математического моделирования и выбранного критерия оптимизации $E_ф$ рассмотрены три схемы ЗОА (см. рис.1): 1 - одна ВРМ ОЗС-50/25/10; 2 - одна ВРМ ОЗС-50/25/10 и последовательно функционирующий ТБ ЗАВ-10.90000А; 3 - одна ВРМ ОЗС-50/25/10 и два параллельно функционирующих ТБ ЗАВ- 10.90000А.

В качестве исходного зернового материала принято зерно пшеницы, поступающее для первичной очистки в ЗОА после зерноуборочного комбайна, с усредненным (ЮФО, Ростовская область) содержанием основных j-х компонентов: зерно пшеницы (0,886), зерновые примеси (0,040), мелкие сорные примеси (0,010), полова (0,005), соломистые примеси (0,003), крупные примеси (0,040), овсюг (0,001), дробленое зерно (0,015). Состав зернового материала варьировался в следующих интервалах: щуплое зерно {0,025; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08}, дробленое зерно {0,005; 0,01; 0,02; 0,03}, овсюг {0,001;0,01;0,02;0,03}. Подача зернового материала в зерноочистительный агрегат варьировалась следующим образом: при функционировании агрегата по первой и второй схемам: {6; 9; 12; 15; 18; 21} т/ч; по третьей схеме: {12; 15; 18; 21} т/ч.





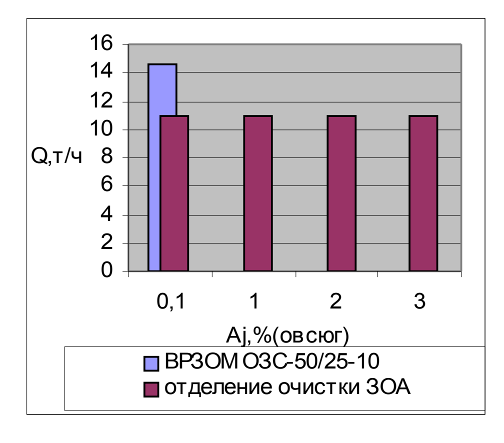
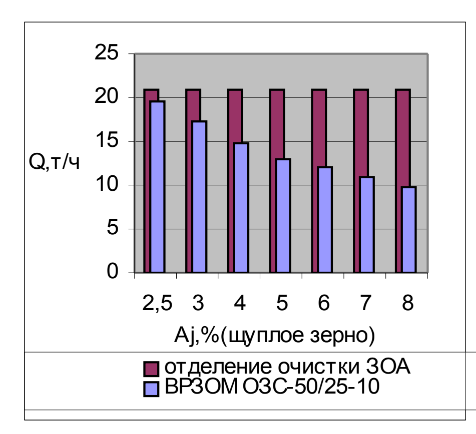
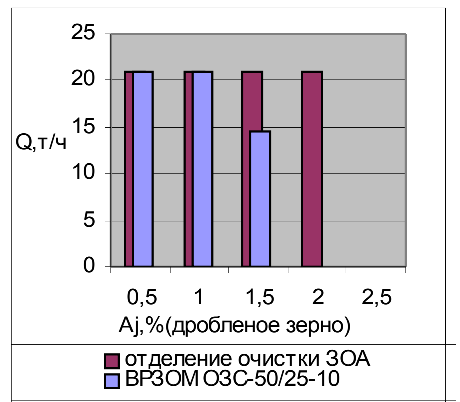


Рис.3. Изменение производительности Q агрегата при вариации содержания в исходном зерновом материале щуплого зерна, дроблёного зерна и овсюга при функционировании одной ВРМ (схема 1) и отделение очистки ЗОА (схема 2)

Параметрическая оптимизация зерноочистительных машин в агрегате (рабочая скорость воздушных потоков в аспирационных системах, форма и размеры отверстий на трех решетных ярусах, частота колебаний решетного модуля при известных [1] плотностях вероятности $f_Q(B)$ распределения подачи зернового материала (Q) по ширине (B) пневмоканала и решетных сепараторов, а также рабочей скорости (Vo) воздушного потока $f_v(B)$ и др. для дискретно задаваемой величины подачи исходного зернового материала и его технологических свойств (влажность, размерные характеристики, скорость витания основных компонентов [1] содержание основ-

ных компонентов) и оценка показателей функционирования отдельных зерноочистительных машин и агрегата в целом проведены на ЭВМ по программе «SH1 S». Выявлены рациональные параметры машин в зерноочистительном агрегате и оценены основные показатели функционирования по различным схемам. Проведена оценка величины производительности различных рассматриваемых агрегатов при вариации подач зернового материала и его технологических свойств (различное содержание в исходном зерновом материале его основных отделяемых компонентов: щуплое зерно, дробленое зерно, овсюг) при обеспечении агропоказателей процесса сепарации. Результаты моделирования представлены на рис.3 и 4.





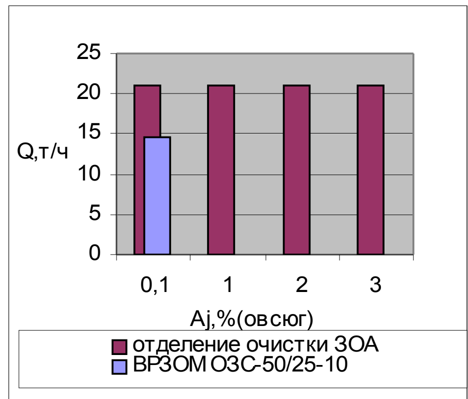


Рис.4. Изменение производительности Q агрегата при вариации содержания в исходном зерновом материале щуплого зерна, дроблёного зерна и овсюга при функционировании одной ВРМ в составе отделения очистки ЗОА (схема 3)

Результаты моделирования. Разработанная математическая модель ЗОА и проведенное моделирование процессов функционирования современных вариантов зерноочистительных агрегатов при первичной очистке зерна пшеницы показали, что при росте содержания в исходном зерновом материале зерновых примесей (щуплое зерно более 4%, дробленое зерно более 1,5%) производительность ВРМ ОЗС-50/25/10 существенно снижается (до 14,55 т/ч). При содержании в исходном зерновом материале овсюга 0,1% производительность ВРМ ОЗС-50/25/10 достигает 14,55 т/ч, а при содержании в исходном зерновом материале овсюга более 0,1% агротребования на процесс очистки зерна в воздушно-решетной машине не выполняются. Использование одного триерного блока ЗАВ 10.90000А совместно с ВРМ ОЗС-50/25/10 (схема №2) несущественно изменяет производительность отделения очистки ЗОА (6 т/ч - 11,25т/ч).

Увеличенное количество триерных блоков (до двух) (схема №3) существенно улучшает технологические показатели ЗОА: при варьировании содержания зерновых примесей (щуплое зерно, дробленое зерно) в пределах 2,5-8% и 0,5-2% соответственно и овсюга в пределах 0,1-3% производительность отделения очистки ЗОА повышается до 21 т/ч, но при содержании в исходном зерновом материале дробленого зерна более 2,5% агротребования не выполняются.

Выводы. Обоснованы и разработаны современные методы математического моделирования процесса функционирования зерноочистительного агрегата, которые позволили, с использованием методов параметрического синтеза, количественно оценивать функциональные показатели отделения очистки зерноочистительного агрегата с одним или двумя триерными блоками. Установлено, что рост эффективности триерования зернового материала значимо влияет на показатели функционирования отделения очистки ЗОА, на его адаптацию к изменению технологических свойств зернового материала и его подачу в агрегат. Целесообразность использования одного или двух триерных блоков к одной воздушно-решетной машине типа ОЗС-50/25/10 в отделении очистки зерноочистительного агрегата определяется эффективностью триерных блоков с учетом экономического анализа функционирования агрегата с различными структурами.

Библиографический список

1. *Ермольев Ю.И.* Технологические основы интенсификации процесса сепарации зерна воздушно-решетными зерноочистительными машинами и агрегатами: Дис…. д-ра техн. наук. / Ю.И. Ермольев. – Ростов н/Д, 1990. – С.300.
2. *Ермольев Ю.И.* Тенденции и перспективы развития технологий и технических средств для семенной очистки зерна/ Ю.И.Ермольев, М.В.Шелков, М.Н.Московский // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия «Технические науки»– Ростов н/Д, 2005. – С.112-119.
3. *Ермольев Ю.И.* Моделирование процесса сепарации зерна в воздушно-решётной зерноочистительной машине / Ю.И. Ермольев, М.В. Шелков // Научные основы решения проблем сельскохозяйственного машиностроения. – Тула: Тул. гос. ун-т, 2003. – С. 86-95.

Материал поступил в редакцию 23.10.07.

U.I. ERMOLJEV, M.U. KOCHKIN

MODELING OF THE PROCESS OF FUNCTION A CLEANING UNIT OF GRAIN

A general approach of a mathematical model building of function a cleaning unit of grain with different structural schemes is given, a rational parameters and functional indexes are synthesis.

ЕРМОЛЬЕВ Юрий Иванович (р.1943**)**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины и оборудование» ДГТУ. Окончил РИСХМ (1969).
Научные интересы: решение проблемы системной сепарации сыпучих гетерогенных сред сельскохозяйственного назначения, направленной на создание новых современных технологий и технических средств для поточной сепарации зерновых и других сельхозматериалов.
Имеет более 200 научных публикаций (в т.ч. три монографии).

КОЧКИН Максим Юрьевич (р.1981), аспирант кафедры «Сельскохозяйственные машины и оборудование» ДГТУ. Окончил ДГТУ в 2004 году.
Специалист в области сепарации сыпучих сред.